

## Список использованных источников

1. Гичев Ю. А., Адаменко Д. С. Эффективность пульсационного сжигания топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – №7. – С. 236–240.
2. Гичев Ю. А., Адаменко Д. С., Ткаченко Г. А. Результаты исследования пульсационного сжигания топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – №7. – С. 161–164.
3. Гичев Ю. А., Адаменко Д. С. Снижение энергозатрат и решение экологической проблемы путем пульсационно-акустического сжигания топлива // *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. – 2006. – №4 (6). – С. 40–42.

УДК 669.013

**Ю. А. Гичев, М. Ю. Ступак**

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПУЛЬСАЦИОННОГО СГОРАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА ПРИ СУШКЕ И РАЗОГРЕВЕ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ

### Аннотация

*Данная работа касается процессов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей при пульсационном сжигании топлива. Пульсации вносят значительные коррективы в процесс выгорания топлива: влияют на конфигурацию и размеры факела, изменяют распределение температуры в факеле и прочее. При сушке и разогреве ковшей непосредственно факелом выгорающего топлива эти изменения определяют конструктивные решения и эксплуатационные режимы термообработки ковшей.*

*Путем математического моделирования выполнен анализ выгорания газообразного топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей. Установлено влияние пульсаций на режим выгорания топлива. Результаты исследования могут быть использованы для выбора уровня углубления горелки в ковш и режима подачи газозоообразной смеси.*

*В частности, установлено, что при пульсационном горении по данным расчета полное выгорание газа происходит на расстоянии двух калибров от среза горелки, т. е. уже в нижней части ковша, исключая этим недожог топлива.*

*Ключевые слова: сталеразливочный ковш, природный газ, выгорание, турбулентный режим, вихреобразование.*

### Abstract

*This work is concerned to processes of casting ladle drying and heating during fuel pulsation combustion. Pulsations make major corrections to the fuel burning-out process: influence on the torch's configurations and sizes, change the torch's temperature distribution and so on. During*

casting ladle drying and heating directly by the fuel combustion torch, this changes define the engineering decisions and operation conditions of casting ladle heat treatment.

The analysis of gas fuel combustion during casting ladle drying and heating was made with mathematical modelling. It was determine of pulsation influence on the fuel combustion condition. The researching results can be used for the level of burner deepening to the casting ladle and conditions of gas-air mixture supply.

Particularly was determined that during pulsation combustion on the researching results the full gas burning-out took place on the two caliber distance from the burner slice, that is in the bottom of casting ladle, excepting the fuel underburning.

**Keywords:** casting ladle, natural gas, burning-out, turbulent condition, vortex formation

При описании процесса пульсационного горения целесообразно использовать понятие об образовании вихрей в турбулентном факеле, размеры и поведение которых в значительной степени определяют характер горения топлива. Трансформация вихрей под воздействием пульсаций является сутью влияния пульсации на процесс горения, так как именно вихри представляются носителями пульсаций внутри турбулентного факела.

По существующим представлениям турбулентный поток при больших числах  $Re$  состоит из вихрей различного масштаба, причем самые крупные из вихрей (макровихри) характеризуются масштабом течения, а самые мелкие (микровихри) определяются условиями естественной и искусственной турбулизации потока. Передача энергии происходит от более крупных вихрей к менее крупным. Выгорание газообразного топлива в объеме микровихрей происходит практически мгновенно, а в объеме макровихрей с запаздыванием, что приводит к неполноте сгорания и снижению температуры горения. В связи с этим эффект горения и конфигурация факела связаны с условием создания оптимального масштаба турбулентных вихрей.

При описании характера образования микровихрей наиболее продуктивным является представление об образовании микровихрей в результате отрыва потока с поверхности канала. Например, в работе экспериментально подтверждена теория образования вихрей в пограничном подслое и влияние шероховатости стенки на масштаб турбулентных вихрей. Картина образования турбулентных вихрей от шероховатости стенки представлена на рис. 1.

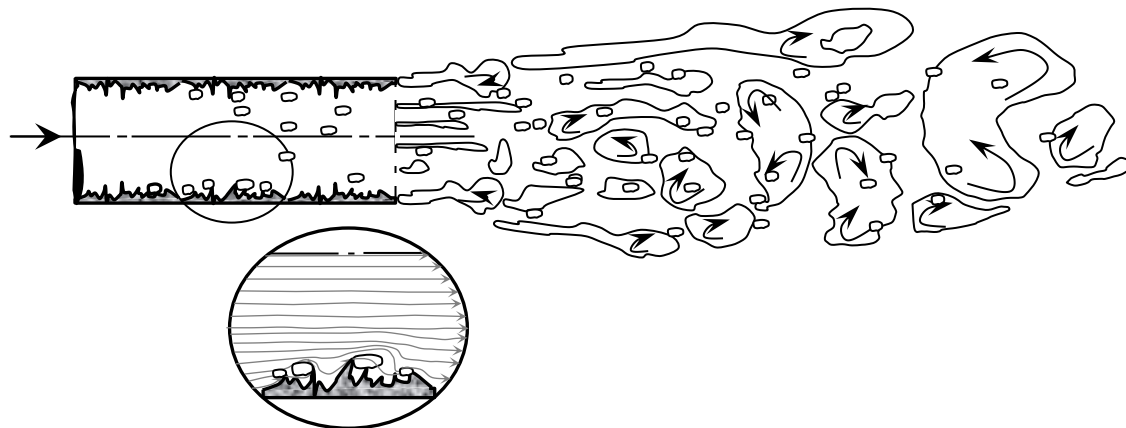


Рис. 1. Образование турбулентных вихрей

На рис. 2 приведены импульсные шпирен-фотографии горящего факела в обычном режиме и с наложением пульсаций.

Из сравнения данных, приведенных на рис. 2, следует, что при воздействии на факел пульсаций происходит изменение структуры факела и характера горения в целом, что выражается в сокращении, примерно в два раза, протяженности ядра факела ( $l_1$ ) по сравнению с обычным режимом горения, в расширении пограничного слоя ( $\delta_{п.с.}$ ), а также в трансформации процесса вихреобразования, сопровождающегося изменением диаметра вихрей ( $d_v$ ).

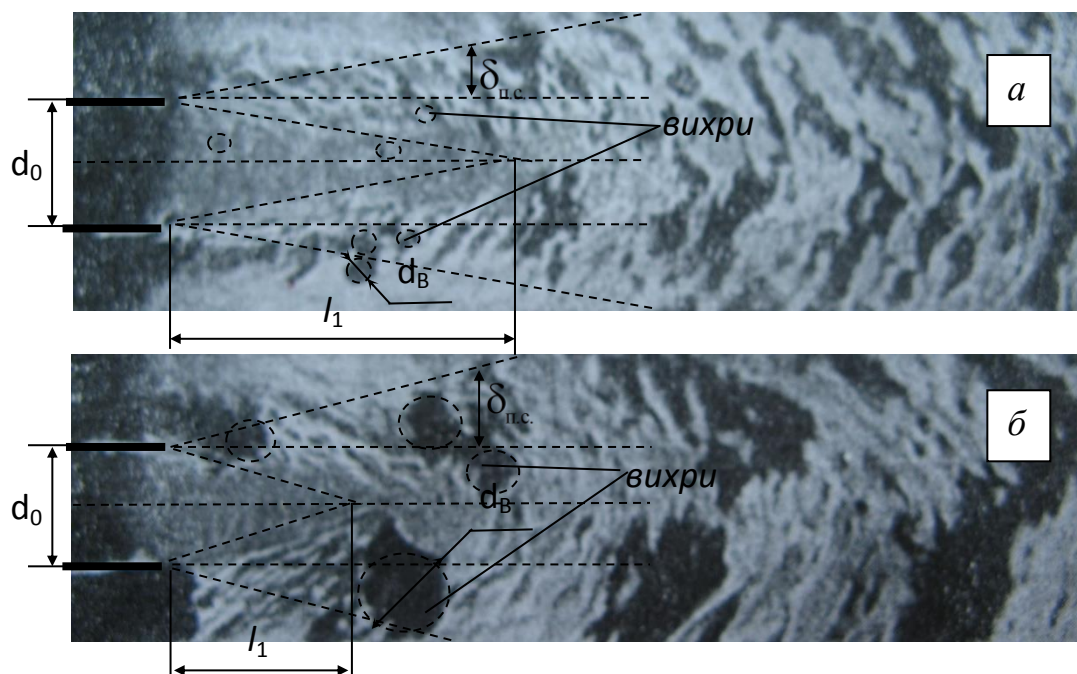


Рис. 2. Структура турбулентного диффузионного факела при обычном режиме горения – а и под воздействием пульсаций – б

Сгорание вихрей сопровождается звуковым эффектом со спектром частот и амплитуд, зависящим от их размеров. При этом частота звукового эффекта  $\nu_\Phi$ , Гц, вычисляется соотношением:

$$\nu_\Phi = u_\Phi / d_v, \quad (1)$$

где  $u_\Phi$  – скорость продвижения фронта горения в газовой смеси, м/с.

Задача данной работы заключалась в аналитическом анализе процесса выгорания газообразного топлива с использованием понятия вихреобразования в турбулентном факеле и характера их поведения в процессе горения топлива.

Образование турбулентных вихрей и схема выгорания газообразного топлива при пульсационном сжигании топлива представлены на рис. 3.

Скорость одиночного вихря в потоке вязкой жидкости определяется выражением:

$$u = \frac{\Gamma}{\pi \cdot d_v} \cdot \left(1 - e^{-\frac{d_v^2}{16\nu\tau}}\right), \quad (1, a)$$

где  $\Gamma$  – циркуляция вихря, м<sup>2</sup>/с;  $d_v$  – диаметр вихря;  $\tau$  – время присутствия вихря в потоке, с;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с.

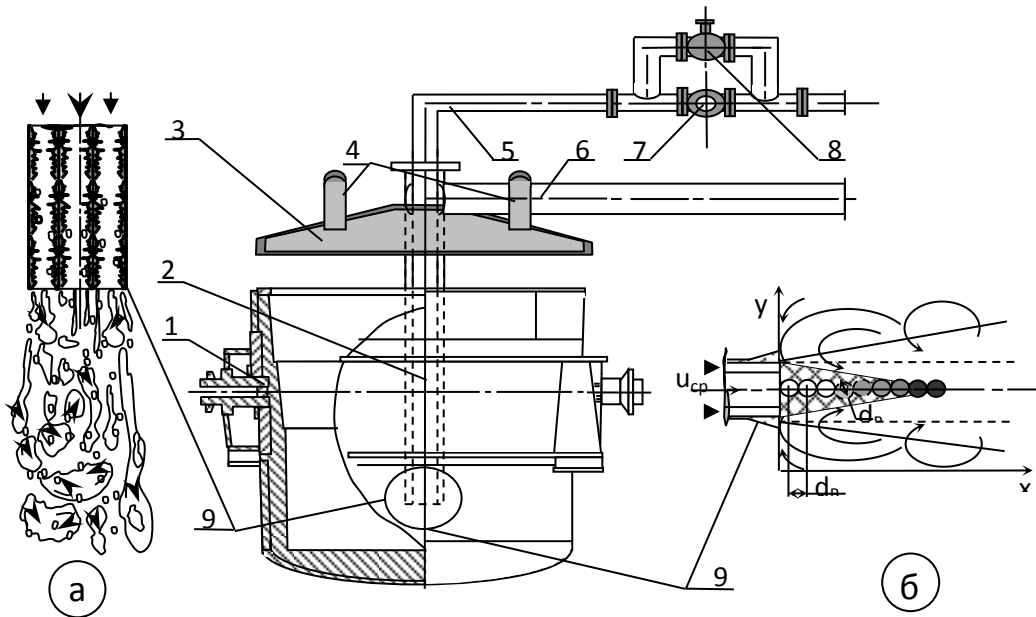


Рис. 3. Образование турбулентных вихрей – а и схема выгорания газообразного топлива – б: 1 – ковш; 2 – горелка; 3 – крышка ковша; 4 – отвод продуктов сгорания; 5 – подвод природного газа; 6 – подвод воздуха; 7 – пульсатор с электродвигателем; 8 – байпас с клапаном; 9 – выходное сечение горелки типа труба в трубе

Принимая во внимание, что периферийная скорость вихря равна скорости потока, выражение для циркуляции вихря определяется произведением:

$$\Gamma = \pi \cdot d_B \cdot u_{CP}, \quad (2)$$

где  $u_{CP}$  – средняя скорость потока, м/с.

Соответственно выражение (1) принимает вид:

$$u = u_{CP} \cdot \left(1 - e^{-\frac{d_B^2}{16\nu\tau}}\right). \quad (3)$$

Совместное решение уравнений движения и неразрывности дает следующее выражение:

$$u_\phi + \left( \frac{d_B}{8 \cdot u_\phi \cdot \tau_K^2} \cdot x + u_{CP} \cdot e^{-\frac{\lambda_\Gamma x}{2d_B}} \right) + \left( \left( \frac{d_B}{8 \cdot u_\phi \cdot \tau_K^2} - u_{CP} \cdot \frac{\lambda_\Gamma}{2 \cdot d_B} \cdot e^{-\frac{\lambda_\Gamma x}{2d_B}} \right) \cdot \rho \cdot e^{-\zeta \frac{3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma}{2 \cdot d_B \cdot \rho_0 \cdot c_p} \cdot \tau} \right) \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

где  $u_\phi$  – скорость распространения фронта горения, м/с;  $\lambda_\Gamma$  – локальный коэффициент гидравлического сопротивления, определяемый значением числа Re;  $\rho$  – плотность газоздуш-

ной смеси,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\zeta$  – эмпирическая постоянная, являющаяся среднестатистической для факельного горения.

Интенсивность выгорания газа по длине факела, а следовательно, и концентрация газа определялась по изменению плотности газовой смеси. При этом изменение концентрации газа подчинялось уравнению  $C = C_0 \cdot e^{-\chi \cdot x}$ . Значение показателя степени  $\chi$ , позволяющего учесть размеры вихрей, определяется из решения уравнения (4):

$$\chi = \frac{\left( \frac{d_B}{8 \cdot u_\Phi \cdot \tau_K^2} - u_{CP} \cdot \frac{\lambda_\Gamma}{2d_B} \cdot e^{-\frac{\lambda_\Gamma x}{2d_B}} \right) \cdot e^{-\zeta \frac{3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma}{2 \cdot d_B \cdot \rho_0 \cdot c_p} \cdot \tau}}{u_\Phi + \left( \frac{d_B}{8 \cdot u_\Phi \cdot \tau_K^2} \cdot x + u_{CP} \cdot e^{-\frac{\lambda_\Gamma x}{2d_B}} \right)} \quad (5)$$

Результаты расчета изменения относительной концентрации горючего газа по длине факела, представленные на рис. 4, позволяют отметить следующее.

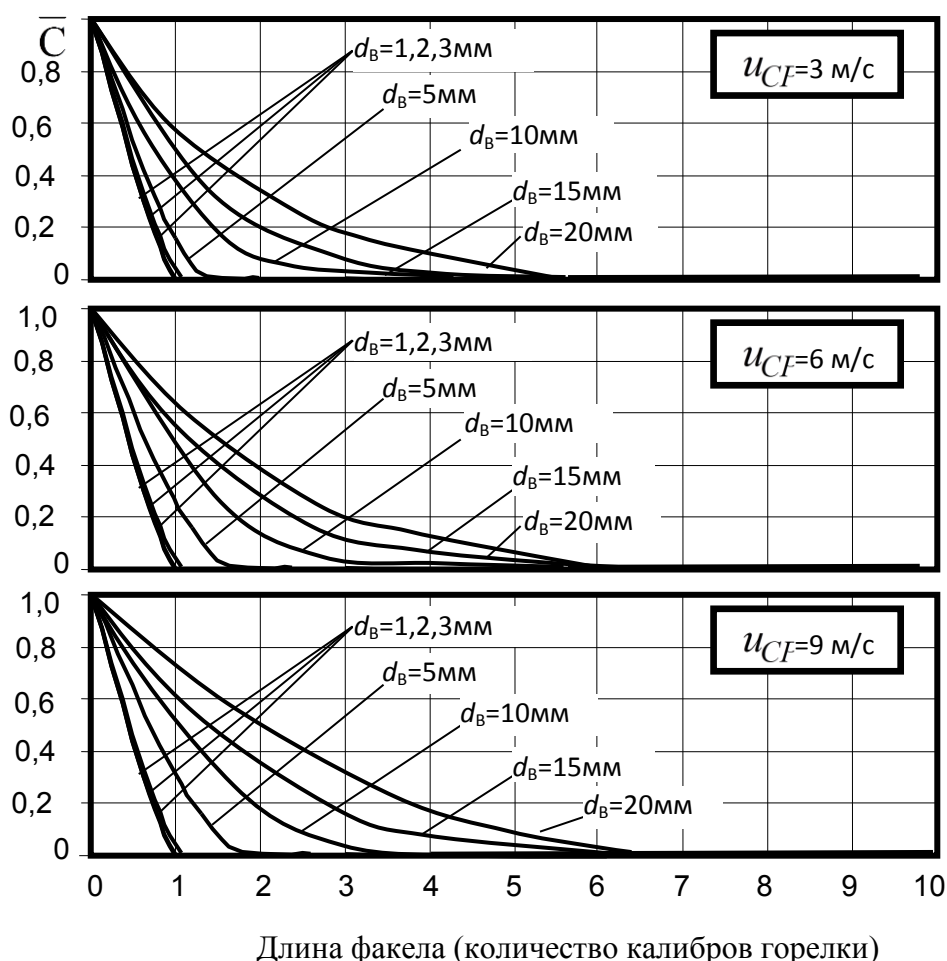


Рис. 4. Изменение относительной концентрации горючего газа по длине факела

Для горелок, применяемых на стендах сушки и разогрева сталеразливочных ковшей с учетом шероховатости труб горелок, диаметры образующихся вихрей ( $d_B$ ) в потоках «газ–воздух» составляют до 5 мм. Это указывает на то, что при пульсационном горении по дан-

ным расчета полное выгорание газа происходит на расстоянии двух калибров от среза горелки, т. е. уже в нижней части ковша, исключая этим недожог топлива.

Таким образом, математическое моделирование позволяет выполнить анализ выгорания газообразного топлива и установить влияние пульсаций на режим выгорания. Результаты исследования могут быть использованы для выбора уровня углубления горелки в ковш и режима подачи газозооушной смеси.

УДК 669.045

**Ю. А. Гичев**

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

## **ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА КОНВЕРТОРНОГО ГАЗА В ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА МЕТАЛЛОЛОМА**

### **Аннотация**

*Оценка энергетического потенциала конвертерного газа, выполненная по результатам вычисления ожидаемых от сжигания газа в процессе нагрева лома тепловых мощностей и на основе совместного решения уравнений тепловых балансов процесса нагрева и конвертерного процесса с учетом его избыточной теплоты, показала возможность нагрева конвертерным газом массы лома, составляющей значительную долю от массы металлошихты кислородно-конвертерной плавки. По результатам расчетов доля лома в металлошихте, которая без подогрева лома составляет максимум 25–30 %, может быть увеличена в результате нагрева лома конвертерным газом на 7,3÷18,5 % в зависимости от варианта нагрева и составить соответственно до 32,3–48,5 % от массы металлошихты.*

*Ключевые слова:* металлолом, нагрев, конвертерный газ, энергетический потенциал, тепловой баланс.

### **Abstract**

*Assessment of the energy potential of converter gas, which made according to the calculating resultsexpectedthermal capacities from the birning of gas in the heating process of scrapand on the basis of the joint solution of the equations of thermal balance of the heating process and converter process taking into account its excessive heat, showed the possibility heating mass of scrap with the converter gas, which constitute a significant proportion of the mass of metal stock oxygen converter smelting. On results of calculations the proportion of scrap in metal stock, which without heating of scrap constitutes a maximum of 25–30% , can be increased in result of heating the of scrap with converter gas at 7,3÷18,5% depending on the version of heating and constitutes, accordingly, to 32,3–48.5% from the weight of metal stock.*

*Keywords:* scrap metal, heating, converter gas, energy potential, the heat balance.

Нагретый конвертерным газом металлоломом позволяет вернуть максимальное количество теплоты газа в конвертер с подогретой шихтой [1], так как доля лома в твердой шихте кислородно-конвертерной плавки наиболее весомая по сравнению с другими компонентами